第41卷　第3期
2024年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41　No. 3
Mar. 2024

DOI:10.13866/j.azr.2024.03.05

塔什库尔干河流域河谷大气降水同位素特征与水汽输送路径

李晗薇[1]，　姚俊强[2]，　容　韬[1]，　张天洋[1]，　高雅洁[1]

(1. 中国气象局气象干部培训学院新疆分院,新疆 乌鲁木齐　830013;
2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐　830002)

摘　要：利用塔什库尔干河流域河谷2018年9月—2020年5月的降水事件的大气降水同位素数据,以及流域河谷代表性气象站点温度、降水、相对湿度等气象资料,分析降水中$\delta^{18}O$、$\delta^{2}H$和氘盈余(d-excess)变化特征,探讨影响因素,并基于拉格朗日后向轨迹模型(HYSPLIT)追踪解析流域河谷大气降水的水汽输送路径。结果表明:(1) 降水$\delta^{2}H$、$\delta^{18}O$值总体上呈现夏季富集、冬季贫化的季节变化特征,且具有显著的温度效应(1.33‰·℃$^{-1}$),但未见显著雨量效应;(2) 局地大气降水线方程为$\delta^{2}H=7.63\delta^{18}O-3.55$,呈现出显著的干旱气候特征;(3) HYSPLIT模拟结果表明研究流域降水水汽主要受西风环流和局地水汽再循环影响,其中夏半年局地水汽蒸发占比54.09%,冬半年西方路径中较长距离输送占比45.53%。8月源自印度洋的水汽可绕过青藏高原到达研究区域。成果可为塔什库尔干河流域水资源管理和气候应对提供参考依据。

关键词：氢氧稳定同位素；大气降水；水汽来源；塔什库尔干河谷

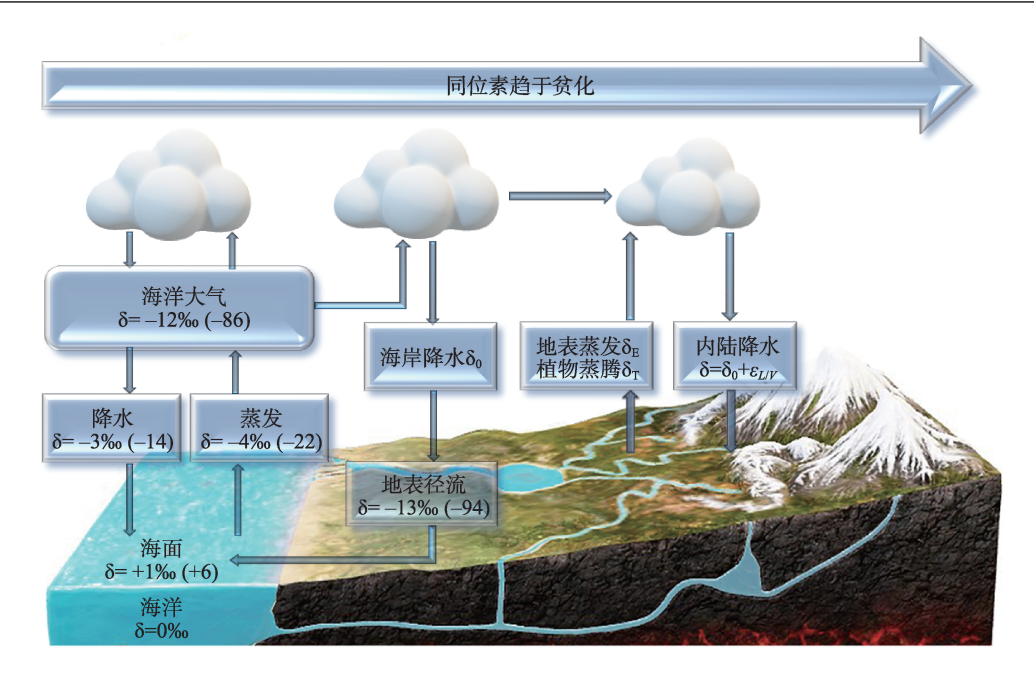
我国高寒山区特别是青藏高原和周边高寒山区是世界上众多大江、大河的发源地,对气候变化的响应极为敏感[1]。帕米尔高原就位于青藏高原的西部,孕育了印度河、阿姆河、叶尔羌河、塔里木河等河流,这些河流在维系水循环平衡和脆弱的生态环境等方面充当极为重要的角色。帕米尔高原周边河流的补给超过50%都来源于其大气降水和冰川融水[2],可见帕米尔高原对中亚水资源的重要作用。

近年研究发现,在全球气候变化背景下,帕米尔高原水体多相态转换速度加快,导致水文过程剧烈变化[3],帕米尔高原冰川呈持续退缩状态[4],这将直接影响到下游生态和经济的可持续发展。塔里木河、叶尔羌河、喀什噶尔河冰雪融水补给径流量比例较高[5],河谷段气候较为干旱,降水较少,因此,帕米尔高原东部降水是影响这些河流水文循环与水资源变化的重要因素。

稳定同位素(^{2}H、^{18}O)是水体的重要组成部分,对气候和环境的变化反应非常敏感,在大气降水形成的过程中,水汽蒸发和凝结的过程中同时会产生氢氧同位素的分馏作用[6-8],使得大气降水中稳定同位素组分因气候和环境差异性呈现出明显的规律性变化,从而可以被视为水循环的天然示踪剂,成为水汽来源[9-10]以及局地水汽再循环研究中的重要技术手段[11-12]。

目前,稳定同位素示踪法被广泛应用于高寒山区的水循环研究。例如,姚檀栋等[13]通过对青藏高原及其周边地区降水稳定同位素的研究,发现其空间分布存在南北差异,北部存在温度效应,南部存在雨量效应,发现南北差异与水汽源地有关;Wu等[14]通过对黑河流域降水稳定同位素的研究,发现降水同位素组成受凝结作用和水汽来源影响;Pang等[15]通过对青藏高原中部冰芯氘盈余的分析,发现青藏高原中部受冬季西风急流和印度夏季风的交替影

收稿日期：2023-10-20；　**修订日期：**2023-12-16
基金项目：国家自然科学基金面上项目(42171038);新疆"天山英才"青年科技拔尖人才专项(2022TSYCCX0005);新疆维吾尔自治区自然科学基金重点项目(2022D01D86)
作者简介：李晗薇(1998-),女,助理工程师,主要从事同位素水文研究. E-mail: hanweili1998@163.com
通讯作者：姚俊强. E-mail: yaojq1987@ 126.com



注：δ值分别为$\delta^{18}O$和$\delta^{2}H$(括号内)，$\varepsilon_{L/v}$是分馏系数。

图1 水循环同位素分馏示意图[11]

Fig. 1 Schematic representation of isotope fractionation in the water cycle[11]

响；饶文波等[16]通过对格尔木河流域降水稳定同位素的研究，发现降水经历了多次蒸发-凝结过程，西风环流及局地水汽循环是流域山区降水的主要贡献者。然而多数对高寒山区的研究集中在青藏高原南部以及昆仑山北侧，很少涉及帕米尔高原一带，且帕米尔高原东部下垫面复杂，海拔较高，目前对其大气降水与水汽来源的研究还十分不足，大气降水的氢氧稳定同位素监测研究也鲜有报道，这大大制约了对我国高寒山区水汽循环的整体认识。

塔什库尔干河作为喀喇昆仑山和昆仑山的界河，叶尔羌河的主要支流之一，是帕米尔高原东部的典型代表区。因此，本文将从同位素示踪的角度出发，选择塔什库尔干河流域上游的塔什库尔干国家基准气候站为帕米尔高原东部典型研究监测点，监测其降水同位素数据，以及降水量、气温、相对湿度等气象数据，拟查明研究流域降水同位素特征，建立研究流域的大气降水线方程，追踪研究流域降水水汽输送路径。研究成果可补充高寒山区同位素水文资料的不足，进一步加深对高寒山区降水水汽输送路径的科学认识，深入理解高寒山区水汽循环理论，同时为当地水资源的合理利用提供科学的指导，对提高灾害预报能力和社会防灾减灾气象服务水平具有重要的现实意义。

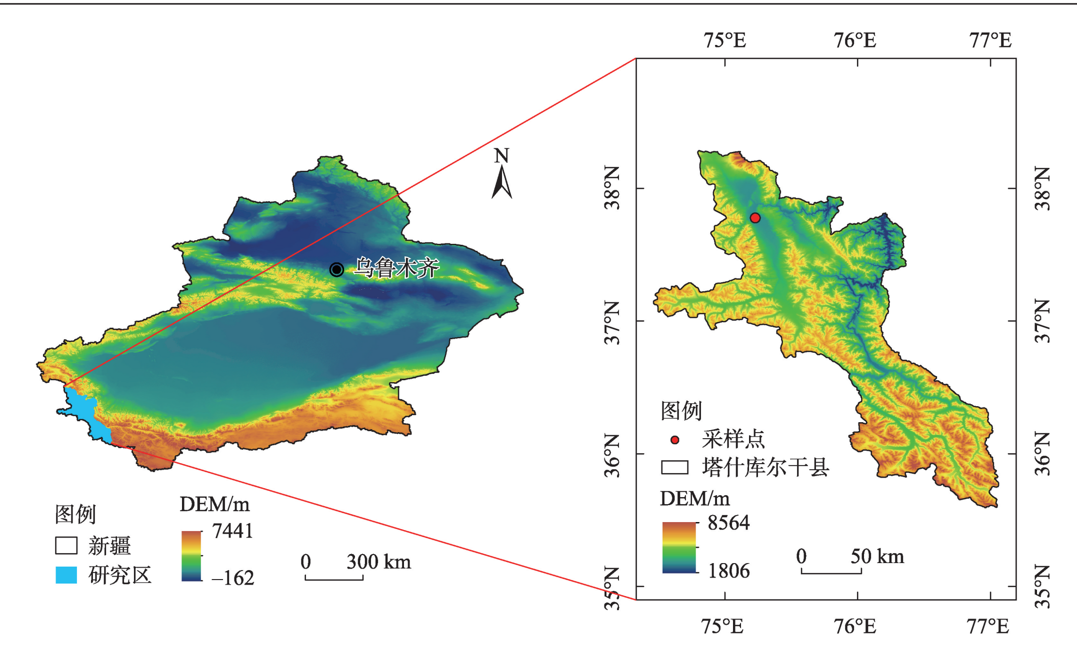
1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

塔什库尔干河是叶尔羌河的主要支流之一，流域位于帕米尔高原东部，发源于喀喇昆仑山山脉、昆仑山山脉的交汇地，平均海拔4000 m以上，流域内有多座海拔6000 m以上高峰[17]。塔什库尔干河流域属于大陆性高原干旱气候，年平均气温8~12 ℃，最低气温-43 ℃，年均大于七级大风的天数可达60 d以上，全年降水以固态降水为主，年平均降水量63 mm，蒸发量2327 mm[18]。河源区位于青藏高原和西北干旱区的交汇处，又因喀喇昆仑山山脉、昆仑山山脉的阻挡，使得在流域内形成了独特的气候和水文特征。河源区分布着冰川600余条，河谷段又分布着大小不一的湖泊和沼泽[19]。其大气降水和冰川融水更为周边河流提供了超过50%的径流来源[2]，对中亚的水资源有着至关重要的作用。

1.2 样本采集与测定

本研究于2018年9月至2020年5月在塔什库尔干流域河谷塔什库尔干县，以降水事件为单位，进行了样品采集，共采集样品48个。将降水收集装置用超纯水清洗并烘干，于降水事件发生时开始接收水。降水盛装于事先洗净的高密度聚乙烯



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2023)2767号，对底图边界无修改。

图2　研究区概况示意图

Fig. 2　Schematic representation of the study area

(HDPE)样品瓶中，为防止蒸发，采用封口膜进行密封。降水样品采集后在同位素与化学分析之前于冰箱中4 ℃条件下保存，随后运往中国气象局树木年轮理化实验室进行分析测试。同时采集温度、降水量、相对湿度等气象数据。根据西北内陆高寒山区降水和气温的变化规律，夏半年为4—9月，冬半年为10月—次年3月[20]。

水样由液态水稳定同位素分析仪进行测定，δ^2H和$\delta^{18}O$精度为0.5‰和0.2‰。分析结果以维也纳标准平均海洋水的δ值来表示：

$$\delta=\left(\frac{R_{样品}}{R_{标准}}-1\right)\times 1000‰ \tag{1}$$

式中：$R_{样品}$是降水样品中重同位素和轻同位素绝对丰度之比(‰)；$R_{标准}$是维也纳标准平均海洋水中重同位素和轻同位素绝对丰度之比(‰)。

Dansgaard[6]于1964年定义了氘盈余(*d*-excess)，提出影响降水中稳定同位素时空分布的相关因素为温度效应、纬度效应、海拔效应、雨量效应和大陆效应，在示踪降水水汽来源中具有重要作用，可表示为：

$$d\text{-excess}=\delta^2H-8\delta^{18}O \tag{2}$$

大气降水稳定同位素的加权平均计算公式为：

$$\delta_w=\frac{\Sigma\delta_i\times P_i}{\Sigma_{P_i}} \tag{3}$$

式中：δ_w是大气降水稳定同位素加权平均值(‰)；i是降水事件；δ_i是相对应稳定同位素值(‰)；P_i是相对应的降水量(mm)。文中月平均降水氢氧稳定同位素值由此公式获得。

1.3　数据来源

本文所用于研究降水稳定同位素与气象条件关系的气象数据来源于塔什库尔干国家基准气候站取样时的实测数据；用于计算后项轨迹的全球再分析资料和全球资料同化系统气象要素数据(Global Data Assimilation System，GDAS)来源于美国国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction，NCEP)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmosphere Research，NCAR)，时间分辨率6 h，空间分辨率1°×1°。

1.4　降水水汽来源后项轨迹模型

本文使用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)与澳大利亚气象署(BOM)研发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model，HYSPLIT)，进行气团的后项轨迹模拟[21-22]。该模型是通过Meteoinfo软件中的TrajStat插件进行运行使用，运行所用数据为GDAS数据。参考周边地区和以往的水汽来源相关研究，本研究以塔什库尔干国家基准气候站(37°46′31″N，75°13′47″E，海拔3089.7 m)为终点，起始高度设置

为1000 m[23]，起算时间为世界协调时0:00，间隔为6 h（世界协调时0:00、06:00、12:00、18:00），因平流层水汽平均停留时间为10 d左右，所以将后项轨迹延伸时间定为240 h[24-25]。通过模拟获得研究区域降水月的水汽输送轨迹，采用角距离（Angle Distance）算法聚类，分析计算得到的冬半年和夏半年的平均轨迹与所占比重[26]。

2 结果与分析

2.1 塔什库尔干河流域河谷降水稳定同位素变化特征

2018年9月至2020年5月期间塔什库尔干河流域河谷日降水稳定同位素δ²H、δ¹⁸O变化范围分别为−255.71‰~−0.19‰、−33.44‰~0.80‰，降水量加权平均值分别为−109.07‰、−14.20‰（图3、图4与表1）。而中国降水稳定同位素δ²H、δ¹⁸O的范围分别为−190‰~20‰、−24‰~2.0‰，均值分别为54.82‰和−7.95‰[19]。研究区降水稳定同位素的范围大于中国大气降水的范围，这体现了其位于西北内陆高寒山区，其地貌复杂，海拔跨度大，使得降水的形成过程比较复杂的特点。而研究区降水稳定同位素的均值小于中国大气降水的均值，这可能是由于其距海洋较远，而水汽从海洋向研究区长距离输送过程中，降水稳定同位素逐渐贫化，到达的水汽所形成的降水稳定同位素值就呈现贫化显著的特征，此外，研究流域内降水较少，较为干燥，同时海拔和纬度较高，也是导致降水稳定同位素年内变化显著的因素之一。

从历次降水事件来看，δ¹⁸O出现了两次正值分别为0.24‰和0.3‰，出现在2019年6月21日到22日的一次天气过程中，两次降水量都较小分别为0.5 mm和1.2 mm，日均温11.6 ℃和12.7 ℃，此次降水发生时，气温较高，降水量小，蒸发作用较为强烈。在下落过程中，重同位素产生富集，δ¹⁸O出现正值。

塔什库尔干河流域河谷降水同位素具有较为明显的夏半年富集、冬半年贫化的季节变化特征（图4）。降水δ²H和δ¹⁸O值均表现为2018年9—12月逐渐贫化，2019年1—8月不断富集，2019年9月—2020年1月逐渐贫化，2020年2—5月不断富集的变化规律。降水δ²H和δ¹⁸O最大值分别为−0.19‰、0.80‰，出现在6月、8月，最小值分别为−255.71‰、−33.44‰，出现在1月。冬半年δ¹⁸O的加权平均值为−20.34‰相较于其夏半年的加权平均值−10.36‰偏负，也表现出夏半年富集、冬半年贫化的季节变化特征。塔什库尔干河流域河谷降水稳定同位素的月变化与南昌[27]、昆明[28]、广东[29]等地的降水稳定同位素季节特征相反，降水δ²H和δ¹⁸O在研究流域内表现为夏高冬低的特征，而在受东亚季风影响的区域降水δ²H和δ¹⁸O表现为夏低冬高的特征。这一显著差异体现了塔什库尔干河流域所处的西北内陆高寒山区地区和东亚季风区[30]的降水季节性变化差异，东亚季风区降水量和温度年际变化相较研究流域变化较小，水汽来源也有较大差异。

塔什库尔干河流域河谷降水氘盈余值（*d*-excess）变化范围为−26.98‰~26.50‰，降水量加权平均值为4.52‰（图4，表1），与全球降水氘盈余值10‰[31]相比较小。*d*-excess值大小可表示出局部地区云团形成时热力条件和水汽平衡条件，还可反映降水形

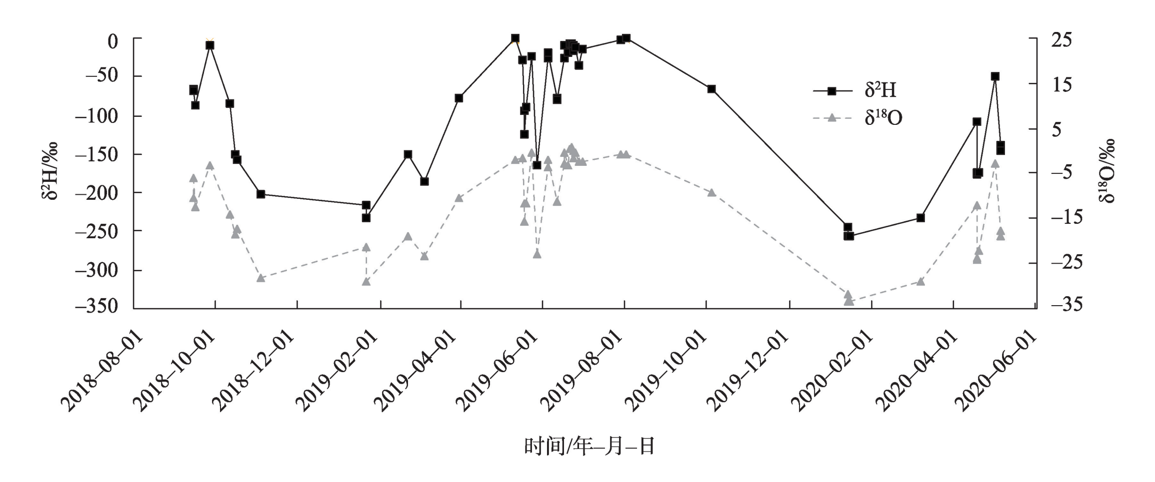


图3 研究区降水事件中氢氧稳定同位素组成随时间的变化

Fig. 3 Hydrogen and oxygen stable isotope compositions over time during precipitation events in the study area

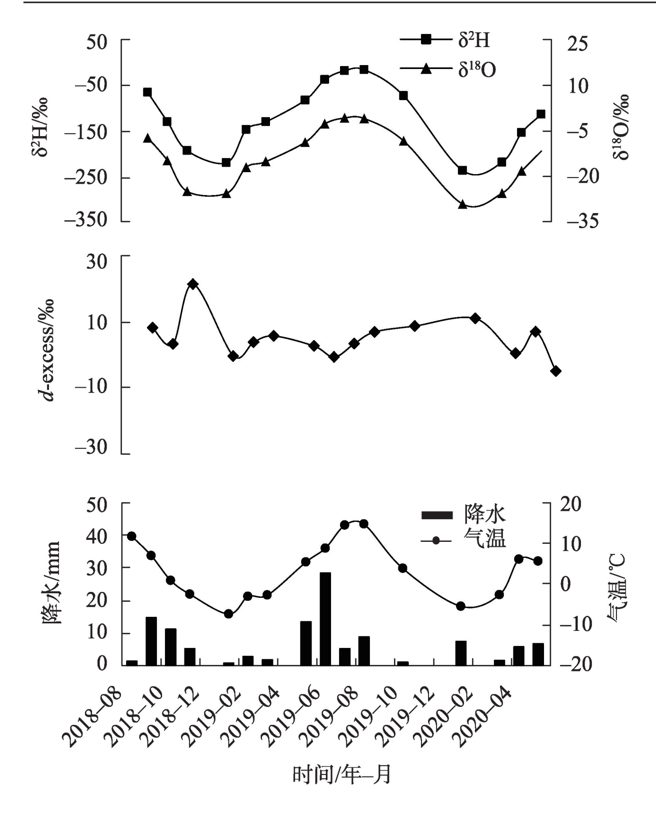


图4　研究区月降水氢氧稳定同位素组成和气象要素随时间的变化

Fig. 4　Variations in the stable isotope composition of hydrogen and oxygen in monthly precipitation and meteorological elements over time in the study area

成时地理环境和气候条件[6,32]。塔什库尔干河流域河谷段的 d-excess 值偏负的原因可能是研究流域内降水来源于动力分馏作用较弱地区,且研究流域内蒸发对其影响可能较弱,云团和降水的形成条件综合导致研究流域 d-excess 值偏负。

2.2　局地大气降水线方程

在研究水循环的过程中,大气降水中的 δ^2H 和 δ^{18}O 线性关系具有重要意义。利用48个降水样本中的 δ^2H 和 δ^{18}O 数值,采用一元线性回归分析法进行线性拟合,得到研究流域的大气降水线方程为:

$$\delta^2\mathrm{H} = 7.63\delta^{18}\mathrm{O} - 3.55,\ (R^2 = 0.97) \tag{4}$$

拟合结果显示 R^2 为0.97,可以看出 δ^2H 和 δ^{18}O 显著相关。研究流域局地大气降水线方程与全球大气降水线($\delta^2\mathrm{H} = 8\delta^{18}\mathrm{O} + 10$)和中国大气降水线方程($\delta^2\mathrm{H} = 7.9\delta^{18}\mathrm{O} + 8.2$)[33]相比,研究流域的斜率和截距都偏低。其中,大气降水方程的斜率表示 δ^2H 和 δ^{18}O 的分馏速率,截距表示在平衡状态时 δ^2H 的偏离程度[31]。因此,研究流域大气降水线方程与全球大气降水线方程和全国大气降水线方程相比斜率和截距都出现偏低的现象,表明研究流域的蒸发作用对降水中 δ^{18}O 和 δ^2H 的分馏影响相对较强,较大程度地偏离了平衡状态,呈现显著的干旱气候特征。

3　讨　论

3.1　降水稳定同位素与气象条件的关系

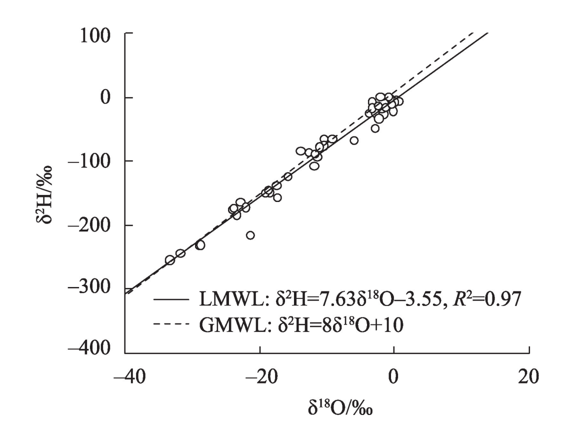
通过对塔什库尔干河流域河谷降水 δ^2H、δ^{18}O 值与温度进行相关性分析得出,气温每上升1 ℃,δ^2H 值增加 10.10‰(R^2=0.63),δ^{18}O 值增加 1.33‰(R^2=0.62)。塔什库尔干河流域地处我国西北内陆地区,纬度和海拔较高,降水稳定同位素具有显著的温度效应。这与在托来河流域[34]、干旱内陆河流域[35]、乌鲁木齐[36]的研究得到我国西北地区降水同位素与气温具有正相关关系的结论一致。

塔什库尔干河流域年降水量偏低,且主要集中在夏季,冬季的降水较少。由图6和表2可知,研究流域的降水稳定同位素并未表现出显著的雨量效应,通过对研究流域降水 δ^2H、δ^{18}O 值与降水量进行

表1　研究区次降水事件氢氧稳定同位素组成统计结果

Tab. 1　Statistical results of hydrogen and oxygen stable isotope composition of precipitation events in the study area

时间(样品数/个)	同位素类型	最小值/‰	最大值/‰	加权均值/‰	算数均值/‰	标准偏差
夏半年(34)	δ^2H	−231.45	−0.19	−80.01	−70.93	66.78
	δ^{18}O	−28.80	0.80	−10.36	−8.87	8.97
	d-excess	−26.98	18.03	2.90	0.04	10.85
冬半年(14)	δ^2H	−255.71	−8.28	−155.57	−144.64	80.19
	δ^{18}O	−33.44	−3.23	−20.34	−18.99	10.05
	d-excess	−20.30	26.50	7.11	7.24	13.46
全年(48)	δ^2H	−255.71	−0.19	−109.07	−92.43	78.47
	δ^{18}O	−33.44	0.80	−14.20	−11.82	10.37
	d-excess	−26.98	26.50	4.52	2.14	12.12



注：LMWL（Local Meteoric Water Line）为局地大气降水线；GMWL（Global Meteoric Water Line）为全球大气降水线。

图5 研究区局地大气降水线

Fig. 5 Local Meteoric Water Line in the study area

相关性分析得出，研究流域大气降水稳定同位素的雨量效应为−8.77‰·mm^{-1}（R^2=0.052）、−1.25‰·mm^{-1}（R^2=0.052），其相关性并不明显，出现这一现象的原因可能是温度效应明显，掩盖了雨量效应。这与吴锦奎等[37]对黑河流域得出降水稳定同位素与降水量成微弱负相关的研究结论，以及朱建佳等[38]在柴达木盆地的研究得出降水量效应基本不存在的结论一致。因此，塔什库尔干河流域河谷降水稳定同位素的雨量效应不是决定性因素。

为进一步分析研究流域降水δ^{18}O值与温度、降水量的关系，将三者进行偏相关分析。在控制温度变量时，降水量与δ^{18}O值的偏相关系数为−0.213（P=0.15）；在控制降水量变量时，温度与δ^{18}O值的偏相关系数为0.783（P<0.01）。可见，在排除温度效应时，降水量与δ^{18}O值的负相关性有所上升，但不是决定性因素。为明确温度、降水量对研究流域降水δ^{18}O值的共同作用，应用二元线性回归模型拟合得到了二元线性回归方程：

$$\delta^{18}O = 0.77T - 0.13P, \ (R^2 = 0.64) \tag{5}$$

从上式进一步可以看出，研究流域降水δ^{18}O值主要受到温度的影响，而雨量效应并不明显。这与Yu等[39]在帕米尔高原和郑新军等[40]在准噶尔盆地得出的结论一致，温度效应主导了降水中δ^{18}O的变

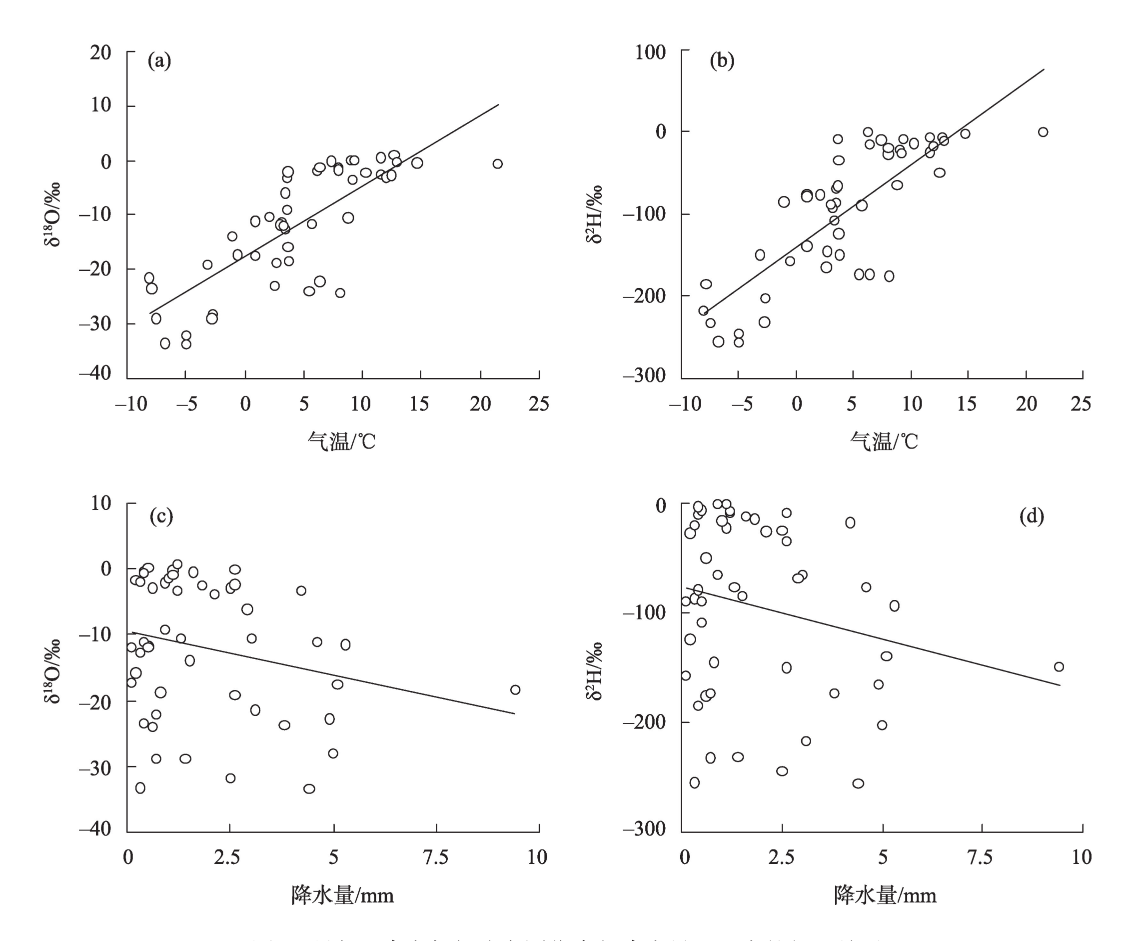


图6 研究区降水氢氧稳定同位素与降水量和温度的相互关系

Fig. 6 Hydrogen and oxygen stable isotope correlation with precipitation and temperature in the study area

表2　研究区日降水事件氢氧稳定同位素组成与主要气象因子相关系数

Tab. 2　Correlation coefficients between hydrogen and oxygen stable isotope composition of daily precipitation events and major meteorological factors in the study area

参数	气温/℃	相对湿度/%	降水量/mm	δ^2H/‰	$\delta^{18}O$/‰
相对湿度/%	−0.70(0.00)				
降水量/mm	−0.12(0.00)	0.18(0.00)			
δ^2H/‰	0.79 (0.00)	−0.37(0.00)	−0.21(0.00)		
$\delta^{18}O$/‰	0.79 (0.00)	−0.38(0.00)	−0.23(0.00)	0.24(0.00)	
d-excess/‰	−0.27 (0.22)	0.16(0.00)	0.20(0.89)	−0.31(0.00)	−0.44(0.00)

注:括号中的数据为显著性参数*P*值。

化且一定程度上掩盖了雨量效应。

在追踪大气降水稳定同位素来源中,氘盈余值是重要的示踪剂,其可以反映水汽来源的重要信息[41],氘盈余的主要影响因素是温度和相对湿度[20]。将研究流域氘盈余与相对湿度利用一元线性回归分析法进行线性拟合,得到拟合方程为:

$$d\text{-excess}=0.11RH-6.30,(R^2=0.027,P<0.01) \quad (6)$$

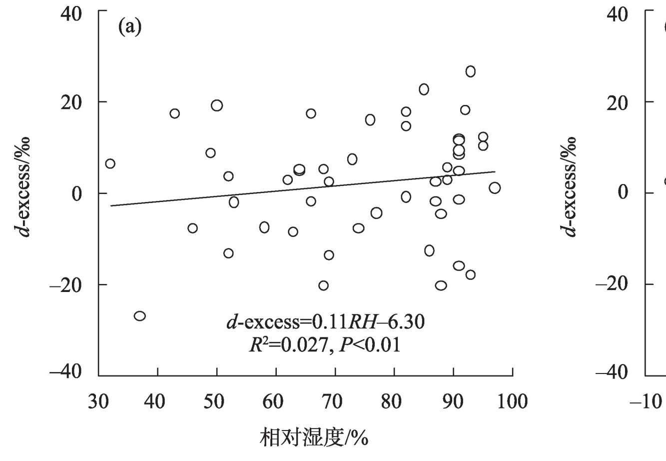
上式表明研究流域氘盈余与相对湿度表现出较弱的正相关关系。通过进一步分析,将氘盈余按照相对湿度划分为三部分,当相对湿度在小于50%时,氘盈余和相对湿度正相关关系较为明显(r=0.42);当相对湿度大于50%时,氘盈余和相对湿度相关关系较弱,尤其是当相对湿度大于80%时,氘盈余随相对湿度变化的规律并不明显。将研究流域的氘盈余与温度利用一元线性回归分析法进行线性拟合,得到拟合方程为:

$$d\text{-excess}=-0.53T+4.57,(R^2=0.072,P=0.22) \quad (7)$$

结果表明研究流域氘盈余与温度表现出较弱的负相关关系。通过进一步分析,将氘盈余按照温度划分为三部分,当温度在大于10 ℃时,氘盈余和温度正相关关系较为明显(r=0.41);当温度在0~10 ℃时,氘盈余和温度相关关系较弱,而当温度小于0 ℃时,氘盈余随相对湿度变化的规律并不明显。宋洋[23]等对塔里木河流域东部站点的研究中发现,当温度高于20 ℃时,氘盈余与气温的负相关关系较为明显。塔什库尔干河流域河谷降水的48次降水事件中平均气温4.32 ℃,温度高于20 ℃的降水事件仅一次并不具有代表性。因此,研究流域氘盈余与气温的负相关关系较弱的原因可能是气温较低,这可能与低温环境下蒸发强度较弱有关[42-43]。

3.2　水汽输送路径

氘盈余是表示氢氧稳定同位素在蒸发过程中因发生动力分馏而偏离平衡态程度的变量,氘盈余大小可表示出局部地区云团形成时热力条件和水汽平衡条件,还可反映降水形成时地理环境和气候条件[6]。塔什库尔干河流域河谷降水的氘盈余具有夏半年贫化、冬半年富集的季节变化特征,表明研究流域冬夏两季水汽来源可能有一定差异。研究表



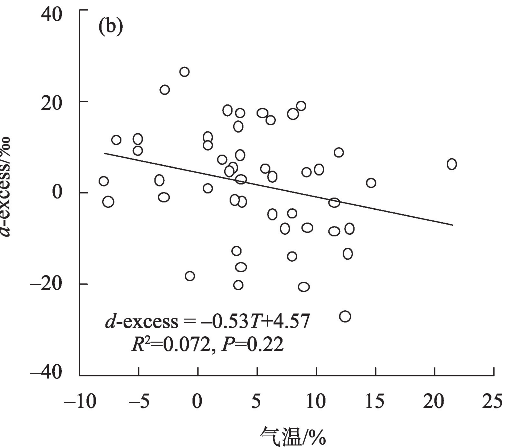
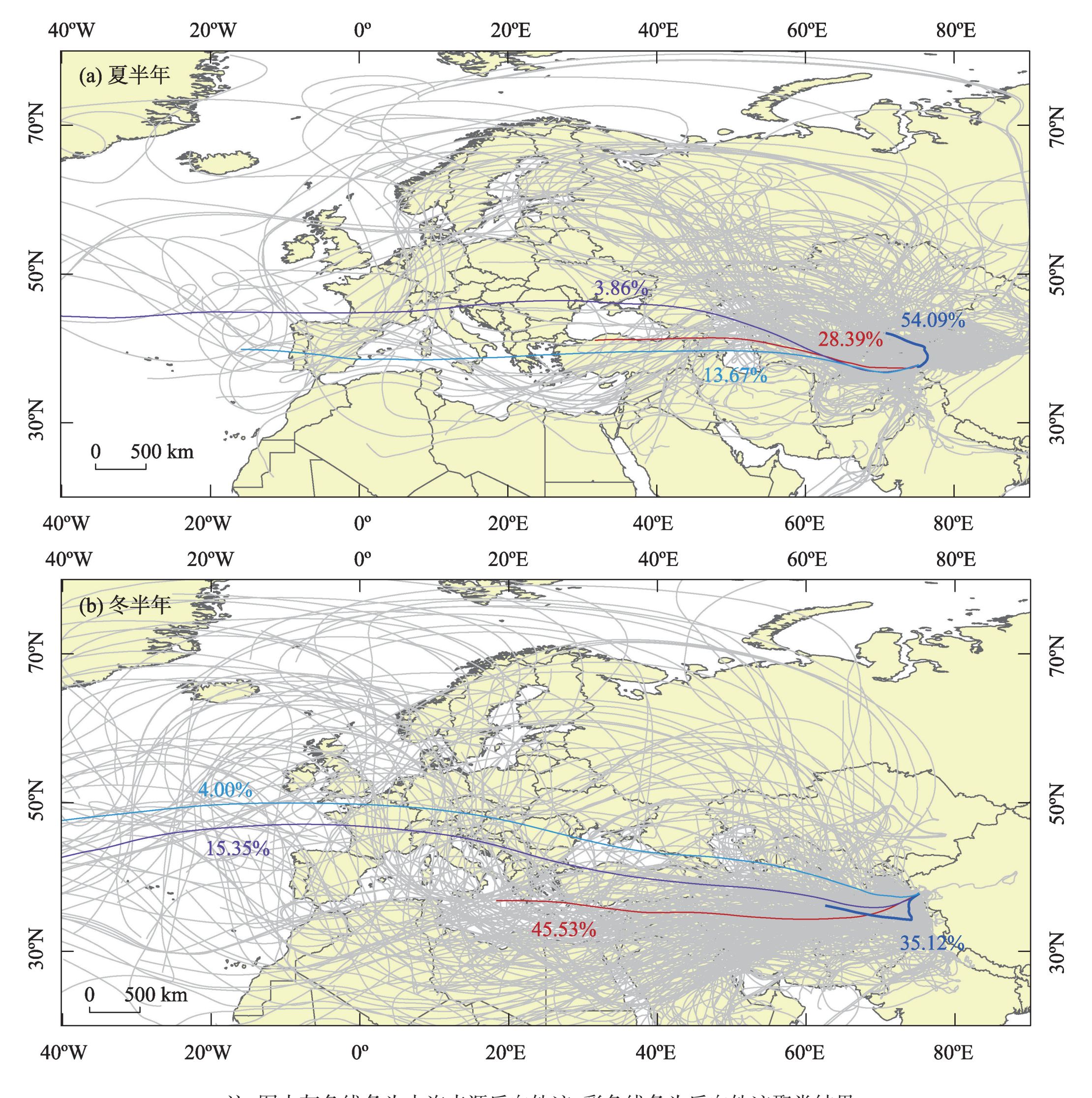


图7　氘盈余(*d*-excess)与相对湿度和气温的相互关系

Fig. 7　Deuterium surplus (*d*-excess) as a function of relative humidity and air temperature

明,水汽来源于高纬度内陆蒸发时,氘盈余值>10‰,水汽来源于低纬度海洋蒸发时,氘盈余值<10‰[31]。同时,在干旱的气候条件下蒸发会造成降水氘盈余偏高[16]。研究时段内研究区降水普遍低于10‰,且存在一定的季节变化特征,这说明研究区域降水可能多数来源于低纬度海洋蒸发,且夏半年和冬半年的水汽来源有一定的差异性。

为进一步了解塔什库尔干河流域河谷降水的水汽来源,图8利用拉格朗日HYSPLIT轨迹模型,对研究流域的降水事件按冬半年和夏半年划分进行水汽追踪并进行聚类分析。结果表明,研究流域受到西风带的影响,其水汽来源以西方路径为主,在西方路径中有远距离的大西洋,较远距离的地中海、里海、黑海也是作为西方路径中水汽的补给来源;南方路径受到青藏高原的阻隔只有在8月才有源于印度洋的水汽输送。同时,相对较近的潜在水源也是研究流域降水的重要水汽来源。夏半年西方路径占比45.92%,其中西方路径上长距离输送的大西洋水汽占比17.53%,较长距离的地中海、里海水汽输送占比28.39%,偏北路径的短距离水汽输送占比54.09%;冬半年水汽则几乎全部来源于西方路径,长距离输送的大西洋水汽占比19.35%,较长距离地中海附近水汽输送占比45.53%,短距离水汽输送占比35.12%。夏半年短距离输送水汽占比远大于冬半年,这可能是夏半年气温偏高,相对湿度偏低,地表蒸发较冬半年旺盛,造成了较强的局地水汽再循环现象。这与孙从建等[44]在亚洲中部高山、赵玮[45]在疏勒河流域的研究结果一致。总的来说,



注:图中灰色线条为水汽来源后向轨迹;彩色线条为后向轨迹聚类结果。

图8 研究区降水水汽来源后向轨迹及其聚类

Fig. 8 Backward trajectories of precipitation water vapor sources and their clustering in the study area

研究流域全年的降水水汽来源主要是西方路径带来的水汽，同时存在局地水汽再循环的现象。

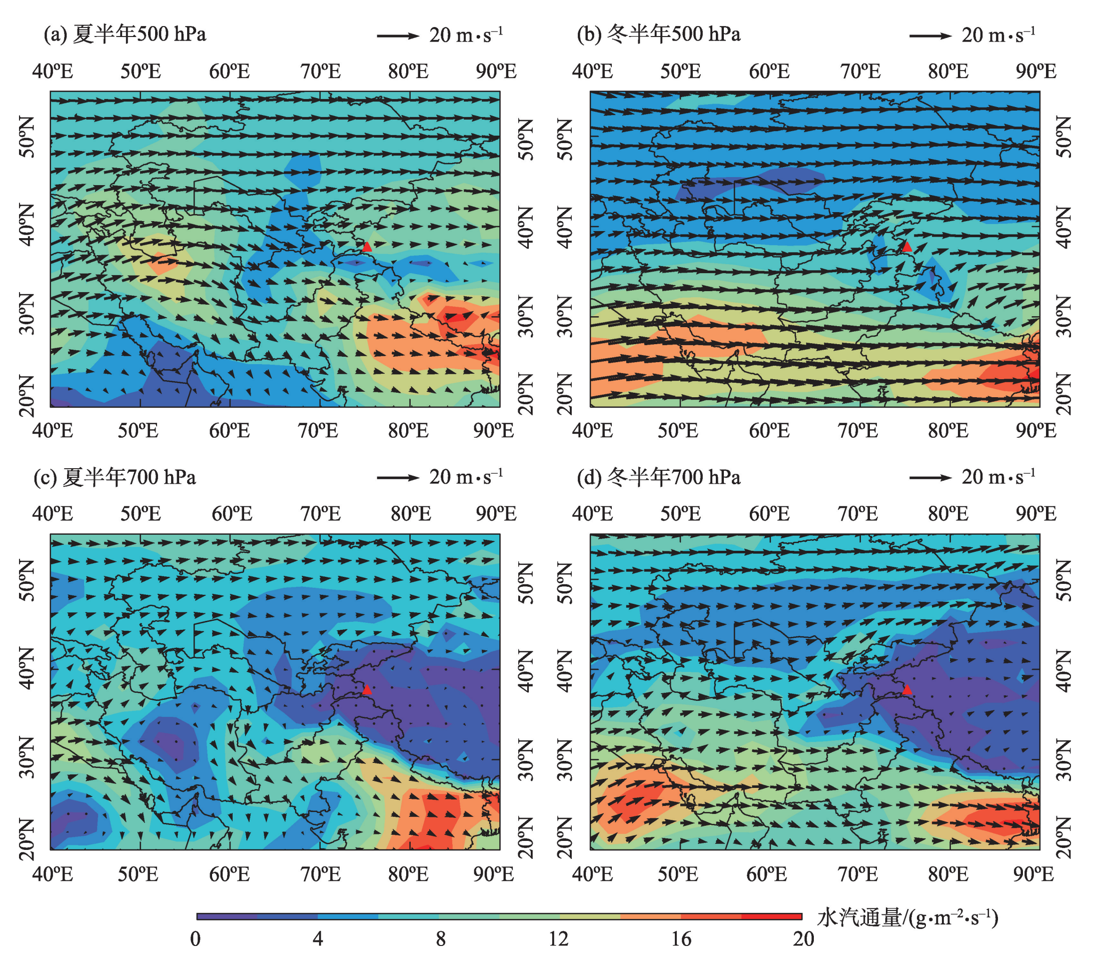
通过水汽输送的过程也进一步说明了研究流域大气降水稳定同位素的季节性变化原因，在夏半年，水汽主要来源于地中海、里海被陆地包围的海域，且局地水汽蒸发占比高达一半以上，导致降水稳定同位素偏高；而在冬半年，来自大西洋开阔洋面的水汽比率增加，同时增加了部分来自极地洋面的水汽，且气温降低，局地水汽蒸发比率减小，导致降水稳定同位素降低。

为更详细的了解研究流域降水水汽来源和通量大小，图9展示了夏半年和冬半年分别在不同气压高度场下的平均水汽通量。在冬半年研究流域的水汽通量较低，500 hPa水汽不足8 mm，几乎全部来源于西风带的输送，700 hPa水汽不足2 mm，除了西方路径，还有部分西南方向的局部循环水汽输送；在夏半年水汽通量有一定升高，500 hPa仍受西风带的影响，700 hPa局地水汽循环有一定程度的增强，但仍不足2 mm。在全年尺度上，700 hPa均出现了一个水汽通量的低值区，这和青藏高原的阻隔有很大关系，而研究流域几乎处于低值区中心位置，这也就进一步解释了研究流域在采样时间段内降水稳定同位素普遍偏低的现象。水汽通量分析与后向轨迹聚类的结果相比具有较好的一致性，进一步表明研究流域水汽输送主要是西方路径，同时存在局地水汽再循环的现象。

4　结　论

本研究于2018年9月至2020年5月在塔什库尔干河流域河谷，以降水事件为单位进行了样品采集，查明了研究区域的降水氢氧稳定同位素组成特征及其影响因素，建立了局地大气降水线方程，追踪了研究区域降水水汽输送路径，得出以下结论：

（1）研究区域的降水$\delta^{2}H$、$\delta^{18}O$值变化范围分别



注：红色三角为采样点；箭头方向代表风向；箭头长度代表风速。

图9　研究区水汽通量

Fig. 9　Water vapour flux map of the study area

为-255.71‰~-0.19‰、-33.44‰~0.80‰,总体上呈现夏半年富集、冬半年贫化的季节变化特征。氘盈余变化范围为-26.98‰~26.50‰,呈现夏半年贫化,冬半年富集的季节变化特征。降水稳定同位素的加权均值和氘盈余的加权均值都小于中国大气降水的均值。研究区域降水稳定同位素具有显著的温度效应(1.33 ‰·℃$^{-1}$),并未表现出显著的雨量效应。

(2) 研究区域局地大气降水线方程为:$\delta^2H = 7.63\delta^{18}O - 3.55$,($R^2 = 0.97$),斜率和截距均小于全球大气降水线方程,呈现出显著的干旱气候特征。由于研究区域下垫面复杂,海拔较高,该降水线能够基本反映整个塔什库尔干河流域的降水信息,可为其水资源管理和气候应对提供参考依据。

(3) 研究区域大气降水水汽输送主要与西风环流和局地水汽再循环密切相关,夏半年局地水汽蒸发占比较大,可达54.09%,冬半年西方路径中较长距离输送占比较大,可达45.53%。特别需要注意的是每年8月(2018年8月和2019年8月)受到东亚季风的影响,源自印度洋的水汽绕过青藏高原可到达研究区域。

参考文献(References):

[1] 程国栋, 金会军. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 1-11. [Cheng Guodong, Jin Huijun. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 1-11.]

[2] 张茜. 帕米尔高原1979—2018年降水时空分布特征分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2021. [Zhang Qian. Characterization of Spatial and Temporal Distribution of Precipitation on the Pamir Plateau, 1979-2018[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2021.]

[3] Li Z X, Gui J, Wang X F, et al. Water resources in inland regions of central Asia: Evidence from stable isotope tracing[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570(1): 1-16.

[4] 曾磊, 杨太保, 田洪阵. 近40年东帕米尔高原冰川变化及其对气候的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 144-150. [Zeng Lei, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Response of glacier variations in the eastern Pamirs Plateau to climate change, during the last 40 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(5): 144-150.]

[5] 陈亚宁. 中国西北干旱区水资源研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Cheng Yaning. Water Resources Research in the Arid Zone of Northwest China[M]. Beijing: Science Press, 2014.]

[6] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.

[7] 章新平, 姚檀栋. 我国降水中δ¹⁸O的分布特点[J]. 地理学报, 1998, 53(4): 70-78. [Zhang Xinping, Yao Tandong. Distributional features of δ¹⁸O in precipitation in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(4): 70-78.]

[8] 章新平, 刘晶淼, 孙维贞. 等. 中国西南地区降水中氧稳定同位素比率与相关气象要素之间关系的研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(9): 850- 859. [Zhang Xinping, Liu Jingmiao, Sun Weizhen, et al. Relationship between oxygen stable isotope ratios in precipitation and related meteorological elements in China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2006, 36(9): 850-859.]

[9] 曾帝, 吴锦奎, 李洪源, 等. 西北干旱区降水中氢氧同位素研究进展[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 857- 869. [Zeng Di, Wu Jinkui, Li Hongyuan, et al. Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in the arid regions of Northwest China: A review[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 857-869.]

[10] 王圣杰, 张明军. 新疆天山降水稳定同位素的时空特征与影响因素[J]. 第四纪研究, 2017, 37(5): 1119-1130. [Wang Shengjie, Zhang Mingjun. Spatio- temporal characteristics and influencing factors of stable isotopes in precipitation across the Chinese Tianshan Mountains[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(5): 1119-1130.]

[11] Gat J R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle [J]. Annual Reviews, 1996, 24(1): 225-262.

[12] Gibson J J, Edwards T W D. Regional water balance trends and evaporation-transpiration partitioning from a stable isotope survey of lakes in northern Canada[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(2): 101-109.

[13] 姚檀栋, 周行, 杨晓新. 印度季风水汽对青藏高原降水和河水中δ¹⁸O高程递减率的影响[J]. 科学通报, 2009, 54(15): 2124-2130. [Yao Tandong, Zhou Xing, Yang Xiaoxin. Influence of Indian monsoon water vapor on precipitation and δ¹⁸O elevation decrement rates in river water on the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(15): 2124-2130.]

[14] Wu J, Ding Y, Ye B, et al. Spatio-temporal variation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River Basin, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(6): 1123-1134.

[15] Pang H. lnfluence of regional precipitation patterns on stable isotopes in ice cores from the central Himalayas[J]. The Cryosphere Discussions, 2013, 7(3): 1871-1905.

[16] 饶文波, 李垚炜, 谭红兵, 等. 高寒干旱区降水氢氧稳定同位素组成及其水汽来源: 以昆仑山北坡格尔木河流域为例[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1116-1125. [Rao Wenbo, Li Yaowei, Tan Hongbing, et al. Stable hydrogen-oxygen isotope composition and atmospheric moisture sources of precipitation in an arid-alpine region: A case study of the Golmud River Watershed on the north slope of the Kunlun Mountains[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1116-1125.]

[17] 王君, 时坤, Philip Riordan. 新疆塔什库尔干有蹄类动物种群密度研究[J]. 山西林业科技, 2012, 41(2): 1-4. [Wang Jun, Shi Kun, Philip Riordan. Study on population density of ungulates in Taxkorgan, Xinjiang, China[J]. Shanxi Forestry Science and Tech-

nology, 2012, 41(2): 1-4.]

[18] 阿布力米提·阿布都卡迪尔, 戴志刚, 史军, 等. 新疆塔什库尔干高山-高原区盘羊和北山羊冬季资源调查报告[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 174-179. [Ablimit Abdukadir, Dai Zhigang, Shi Jun, et al. Investigation of pulation resources of Argali and Ibex on the higher-mountains in Xinjiang Taxkorgan in winter [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24 (11): 174-179.]

[19] 王君. 新疆塔什库尔干地区雪豹生态位研究及种群估算[D]. 北京: 北京林业大学, 2012. [Wang Jun. Ecological Niche Study and PopuLation Estimation of Snow Leopards in the Tashkurgan Region of Xinjiang, China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.]

[20] 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 等. 西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源[J/OL]. 环境科学, 2023: 1-25. [Zhang Yanyan, Xin Cunlin, Guo Xiaoyan, et al. Characteristics of Stable lsotopes in Precipitation and lts Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China[J/OL]. Environmental Science, 2023: 1-25.]

[21] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. Environmental Modelling and Software, 2009, 24(8): 938-939.

[22] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT4 modelling system for trajectories[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47(4): 295-308.

[23] 宋洋, 王圣杰, 张明军, 等. 塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 199-209. [Song Yang, Wang Shengjie, Zhang Mingjun, et al. Stable isotopes of precipitation in the eastern Tarim River basin and water vapor sources [J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 199-209.]

[24] Trenberth K E. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change[J]. Climatic Change, 1998, 39(4): 667-694.

[25] Gat J R. Atmospheric water balance-the isotopic perspective[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(8): 1357-1369.

[26] Wang S J, Zhang M J, Crawford J, et al. The effect of moisture source and synoptic conditions on precipitation isotopes in arid central Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(5): 2667-2682.

[27] 张海发, 郑芳文, 杨海全. 南昌市大气降水H-O稳定同位素特征及其水汽来源解析[J]. 地球与环境, 2023, 51(2): 133-142. [Zhang Haifa, Zheng Fangwen, Yang Haiquan. The stable H-O isotope characteristic of atmospheric precipitation and the moisture source tracing in Nanchang City[J]. Earth and Environment, 2023, 51(2): 133-142.]

[28] 章新平, 孙维贞, 刘晶淼. 西南水汽通道上昆明站降水中的稳定同位素[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 665-669. [Zhang Xinpin, Sun Weizhen, Liu Jingmiao. Stable isotopes in precipitation in the vapor transport path in Kunming of Southwest China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(5): 665-669.]

[29] Xie L, Wei G, Deng W, et al. Daily $\delta^{18}O$ and δD of precipitations from 2007 to 2009 in Guangzhou, South China: Implications for changes of moisture sources[J]. Journal of Hydrology, 2011, 400(3-4): 477-489.

[30] 卫克勤, 林瑞芬. 论季风气候对我国雨水同位素组成的影响[J]. 地球化学, 1994, 23(1): 33-41. [Wei Keqin, Lin Ruifen. The influence of the monsoon climate on the isotopic composition of precipitation in China[J]. Geochimica, 1994, 23(1): 33-41.]

[31] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [Gu Weizu. Isotope Hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011.]

[32] Welp L R, Lee X, Griffis T J, et al. A meta-analysis of water vapor deuterium-excess in the midlatitude atmospheric surface layer[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(3): 1-12.

[33] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801-806. [Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. Hydrogen and oxygen stable isotope studies of atmospheric precipitation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1983 (13): 801-806.]

[34] 李永格, 李宗省, 冯起, 等. 托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2661-2672. [Li Yongge, Li Zongxing, Feng Qi, et al. Environmental significance of the stable isotopes in precipitation at different altitudes in the Tuolai River Basin[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2661-2672.]

[35] 袁瑞丰, 李宗省, 蔡玉琴, 等. 干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2122-2131. [Yuan Ruifeng, Li Zongxing, Cai Yuqin, et al. Space-time characteristics and environmental significance of stable isotopes in precipitation at an arid inland river basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2122-2131.]

[36] Yao T D, Masson V, Jouzel J, et al. Relationships between $\delta^{18}O$ in precipitation and surface air temperature in the Urumiqi River Basin, east Tianshan Mountains, China[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(23): 3473-3476.

[37] 吴锦奎, 杨淇越, 丁永建, 等. 黑河流域大气降水稳定同位素变化及模拟[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 1857-1866. [Wu Jinkui, Yang Qiyue, Ding Yongjian, et al. Variations and simulation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River basin[J]. Environmental Science, 2011, 32(7): 1857-1866.]

[38] 朱建佳, 陈辉, 巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2784-2790. [Zhu Jianjia, Chen Hui, Gong Guoli. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in eastern Qaidam Basin[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2784-2790.]

[39] Yu W S, Tian L D, Risi C, et al. $\delta^{18}O$ records in water vapor and an ice core from the eastern Pamir Plateau: Implications for paleoclimate reconstructions[J]. Earth and Planetary Science Letters: A Letter Journal Devoted to the Development in Time of the Earth and Planetary System, 2016, 10(456): 146-156.

[40] 郑新军, 戴岳, 周海, 等. 准噶尔盆地东南部降水中$\delta^{18}O$的温度

与降水量效应[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 732−738. [Zhen Xinjun, Dai Yue, Zhou Hai, et al. Effect of temperature and precipitation on $\delta^{18}O$ in precipitation water in the southeastern Junggar Basin, China[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 732−738.]

[41] Cui B L, Li X Y. Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2015, 527−528(9): 26−37.

[42] Pang Z H, Kong Y L, Froehlich K, et al. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region[J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 2011, 63(3): 352−359.

[43] Froehlich K, Kralik M, Papesch W, et al. Deuterium excess in precipitation of Alpine regions-moisture recycling[J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2008, 44(1): 61−70.

[44] 孙从建, 张子宇, 陈伟, 等. 亚洲中部高山降水稳定同位素空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 19−28. [Sun Congjian, Zhang Ziyu, Chen Wei, et al. Spatial distribution of precipitation stable isotopes in the Alpine Zones in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 19−28.]

[45] 赵玮. 疏勒河流域大气降水同位素特征及水汽来源研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017, 12. [Zhao Wei. Study on the Isotopes and Moisture Source in Precipitation in the Shule River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017, 12.]

Characteristics of atmospheric precipitation isotope and path analysis of water vapor transport in the Taxkorgan River Basin Valley

LI Hanwei[1], YAO Junqiang[2], RONG Tao[1], ZHANG Tianyang[1], GAO Yajie[1]

(1. Xinjiang Branch China Meteorological Administration Training Centre, Urumqi 830013, Xinjiang, China;
2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: By using stable isotope data of atmospheric precipitation from September 2018 to May 2020 in the Taxkorgan River Basin Valley and meteorological data such as temperature, precipitation, and relative humidity from representative weather stations within the valley, this study analyzed the variation in $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, and deuterium excess (*d*-excess) of precipitation. The influencing factors were explored, and the water vapor transport pathways of atmospheric precipitation in the valley were traced and analyzed using the hybrid single- particle Lagrangian integrated trajectory model (HYSPLIT). Results show that the $\delta^{2}H$ and $\delta^{18}O$ values of precipitation generally present a seasonal pattern of enrichment in summer and depletion in winter, showing a significant temperature effect (1.33‰·℃$^{-1}$), but no significant precipitation effect was observed. The local meteoric water line is $\delta^{2}H=7.63\delta^{18}O-3.55$, which shows distinct arid climate characteristics. The HYSPLIT simulation results indicate that the water vapor of precipitation in the study basin is mainly influenced by the westerly circulation and local water vapor recycling, with local water vapor evaporation accounting for 54.09% in the summer half-year and the long-distance transport of the western route accounting for 45.53% in the winter half-year. Water vapor from the Indian Ocean in August can bypass the Tibetan Plateau and reach the study area. These findings can provide a reference basis for water resource management and climate response in the Taxkorgan River Basin Valley.

Keywords: hydrogen and oxygen stable isotopes; atmospheric precipitation; water vapor sources; Taxkorgan River Basin Valley